



1821 Universidad de Buenos Aires

Resolución Consejo Directivo

Número:

Referencia: EX-2023-07552174- -UBA-DMESA#FCEN - POSTGRADO - Sesión
27/10/2025

VISTO

La nota presentada por la Dirección del Departamento de Física, mediante la cual eleva la información del curso de posgrado **Temas Avanzados en Física del Attosegundo** para el año 2025,

CONSIDERANDO

lo actuado por la Comisión de Doctorado,

lo actuado por este Cuerpo en la sesión realizada el día 27 de octubre de 2025,

en uso de las atribuciones que le confiere el Artículo 113° del Estatuto Universitario,

EL CONSEJO DIRECTIVO DE LA FACULTAD

DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

RESUELVE:

ARTÍCULO 1º: Aprobar el nuevo curso de posgrado **Temas Avanzados en Física del Attosegundo** de 128 horas y 16 semanas de duración, que será dictado por los Dres. Diego Arbó y Hernán Grecco.

ARTÍCULO 2º: Aprobar el programa del curso de posgrado **Temas Avanzados en Física del Attosegundo** que como anexo forma parte de la presente Resolución, para su dictado en el segundo cuatrimestre de 2025.

ARTÍCULO 3º: Aprobar un puntaje máximo de cinco (5) puntos para la Carrera de Doctorado.

ARTÍCULO 4º: Establecer un arancel de **CATEGORÍA BAJA**, estableciendo que dicho arancel estará sujeto a los descuentos y exenciones estipulados mediante la Resolución CD N.º 1072/19. Disponer que los fondos recaudados ingresen en la cuenta presupuestaria habilitada para tal fin, y sean utilizados de acuerdo a la Resolución 072/0.

ARTÍCULO 5º: Disponer que, de no mediar modificaciones en el programa, la carga horaria y el arancel, el presente Curso de Posgrado tendrá una vigencia de cinco (5) años a partir de la fecha de la presente Resolución.

ARTÍCULO 6º: Comuníquese a todos los Departamentos Docentes, a la Dirección de Estudiantes y Graduados, a la Biblioteca de la FCEyN y a la Secretaría de Posgrado con copia del programa incluida. Cumplido, pase a FÍSICA#FCEN y resérvese.

ANEXO

Temas Avanzados en Física del Attosegundo

PROGRAMA

El objetivo del curso es proporcionar nociones básicas de la interacción de la radiación electromagnética con la materia, en especial introducir al alumno al tema de la interacción de pulsos láser ultracortos con los constituyentes principales de la materia: los átomos, las moléculas y los sólidos. La interacción de ondas electromagnéticas con la materia ha sido de gran interés desde el siglo XIX y tuvo un rol fundamental en la formulación de la mecánica cuántica en la primera mitad del siglo XX. Desde la creación del láser en 1960 la duración de los pulsos ha ido acortándose desde casi los milisegundos ($1\text{ms} = 10^{-3}\text{ s}$) en su comienzo, hasta cruzar la barrera de los femtosegundos ($1\text{fs} = 10^{-15}\text{ s}$) hoy en día. Esto abrió un nuevo campo de la física denominada “Attofísica” o “Física del attosegundo” ($1\text{as} = 10^{-18}\text{ s}$), la cual se ha empezado a desarrollar en los comienzos del siglo XXI y ha culminado con el otorgamiento del Premio Nobel de Física 2023 de manera conjunta a Pierre Agostini, Ferenc Krausz, y Anne L’Huillier por el estudio de la dinámica de los electrones en la materia a través de pulsos de luz de attosegundos.

La materia es teórico-práctica y está separada en 12 unidades incluyendo una práctica de problemas. El sistema de evaluación es el siguiente: Para aprobar la materia el estudiante se deberá rendir (i) un parcial o pre-final práctico, (ii) disertar sobre un tema especial a cargo del alumno, y (iii) un examen final. El tema especial está pensado para que los alumnos elijan un contenido de actualidad y/o aplicación y comprende una exposición del alumno de 1 hora más media hora de acotaciones y preguntas del profesor para redondear el tema promoviendo la participación de los demás alumnos. Dependiendo de la cantidad de alumnos se podrá exponer el tema especial en forma individual o de a pares. Los temas especiales serán propuestos por el profesor, aunque se aceptan sugerencias de los alumnos también. Además, el profesor planteará un problema para que los alumnos resuelvan en forma numérica. El final será teórico y comprende las unidades 1 a 12.

Programa:

1. Escalas temporales en procesos atómicos

Estimaciones de orbitas electrónicas: Radio de Bohr, períodos y velocidades.

Transiciones de niveles energéticos y escalas temporales. Tiempos característicos de sistemas físicos.

2. Breve introducción a la Física del Láser

Origen histórico. Balance detallado. Teoría: Inversión de población y emisión estimulada. Medios de propagación. Láser de electrón libre. Evolución: Intensidad y duración del pulso. Barrera del femtosegundo.

3. Revisión de Electromagnetismo

Ecuaciones de Maxwell. Formalismos Lagrangiano y Hamiltoniano: Potenciales escalar y vector. Invariancia de gauge. Electrón clásico en un campo sinusoidal: Energía ponderomotriz y amplitud de oscilación. Electrón cuántico en un campo electromagnético: Estados de Volkov. Campo de radiación electromagnético clásico: Vector de Poynting y aproximación dipolar. Cuantización del campo electromagnético.

4. Sistemas de Unidades

Relación de unidades atómicas de Hartree con el SI y MKS. Unidades atómicas de masa, carga y longitud. Constantes de Planck y estructura fina. Unidades derivadas: Tiempo, frecuencia, potencial eléctrico, intensidad y energía.

5. Teoría de la Ionización atómica por encima del umbral: electrones directos

Condición de ionización. Ionización por encima de la barrera. Ionización por efecto túnel: Parámetro de Keldysh. Ionización multifotónica. Modelo semiclásico: Simple Man's Model. Teoría de Keldysh-Faisal-Reiss: Primera aproximación de Born, aproximación de campo fuerte, aproximación de Coulomb-Volkov, aproximación de onda distorsionada Eikonal-Volkov. Solución analítica de la aproximación de campo fuerte: Modelo de Lewenstein. Espectro fotoelectrónico y distribución de momentos doble-diferencial. Interferencias inter- e intraciclo. Métodos cuasiclásicos: Trayectoria clásica Monte-Carlo.

6. Métodos numéricos y resultados

Solución numérica de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. Evolución temporal. Método pseudoespectral. Efecto cuántico de Zenón: Paradoja de Zenón. Resultados de ionización atómica por encima del umbral: Factor de asimetría, picos multifotónicos. Efectos del potencial del ion remanente en ionización de gases raros: Estructuras cerca del umbral y ley universal.

7. Efectos del potencial del ion remanente en fotoionización

Efectos pequeños del potencial en el espectro de energía de los fotoelectrones:

corrimiento de energía en interferencia intraciclo y estructura cerca del umbral. Efectos fuertes del potencial en el espectro de energía de los fotoelectrones: Procesos de rescattering in fotoionización. Diferentes tipos de interferencia cuántica de los fotoelectrones: directos, indirectos y de rescattering. Holografía cuántica. Efectos Arco Iris y Gloria en la fotoionización atómica.

8. Generación de armónicos altos en fotoionización atómica

Introducción. Modelo de los tres pasos. Proceso de recaptura electrónica. Espectro de armónicos de alto orden. Consideraciones cuánticas. Modelo de Lewenstein. Cálculo exacto. Métodos de medición de la duración de los attopulsos: (I) Streaking de attosegundos. Comportamiento clásico. (II): RABBIT. (Reconstruction of Attosecond harmonic Beating By Interference of Two-photon transitions). Comportamiento cuántico (concepto interferométrico) de la técnica RABBIT.

9. Ionización por Pulsos Ultracortos asistidos por Láser

Aproximación de fotón blando. Modelo semiclásico. Aproximación de campo fuerte. Diferentes Regímenes: streaking y bandas laterales. Dualidad onda-partícula del fotoelectrón. Solución de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo. Bandas laterales y modulaciones intraciclo.

10. Cronoscopía de attosegundos: Streaking

Operador tiempo en la mecánica cuántica. Operador tiempo en teoría de scattering: tiempo de Eisenbud-Wigner-Smith. Fotoionización como proceso de medio-scattering. Desarrollo en ondas parciales y phase-shifts. Retardos temporales en fotoionización con potenciales de corto alcance. Problema con potenciales de largo alcance. Potenciales coulombianos. Medición del efecto Auger.

11. Cronoscopía de attosegundos: RABBIT

Técnica RABBIT para medir los retardos temporales en la fotoionización atómica. Teoría perturbativa. Equivalencia entre los tiempos de streaking y RABBIT. Arreglo tradicional y alternativas a la técnica RABBIT.

12. Fotoionización de superficies por pulsos electromagnéticos ultracortos

Emisión fotoelectrónica de superficies aislantes. Aproximación Volkov de la superficie cristalina (CSV). Interacción de campos electromagnéticos con superficies metálicas. Modelo basado en estructura de bandas: (i) pulsos de alta frecuencia y (ii) pulsos de baja frecuencia.

Carga horaria: 128 horas cuatrimestrales.

Clases teóricas: 32 clases (2 hs. cada una).

Clases de problemas: 16 clases (3 hs. cada una).

Clases de laboratorio de computación: 4 clases (4 hs. cada una).

Correlatividades: Finales de Física 3 y Física 4. Mecánica Clásica, Física Teórica 1 (Electrodinámica Clásica) y Física Teórica 2 (Mecánica Cuántica): (Prácticos con prácticos y final con final).

BIBLIOGRAFÍA

Attosecond spectroscopy for the investigation of ultrafast dynamics in atomic, molecular and solid-state physics, R. Borrego-Varillas, Matteo Lucchini and Mauro Nisoli, Rep. Prog. Phys. 85 066401 (2022).

Ferenc Krausz, *Electrons in Motion: Attosecond Physics Explores Fastest Dynamics*, World Scientific Publishing Company, 2019.

C. D. Lin, Anh-Thu Le, Cheng Jin, *Attosecond and Strong-Field Physics: Principles and Applications*, Cambridge University Press, 2018.

Attosecond chronoscopy of photoemission, R. Pazourek, S. Nagele and J. Burgdörfer, *Reviews of Modern Physics* 87, 765-802 (2015).

Thomas Schultz and Marc Vrakking, *Attosecond and XUV Physics: Ultrafast Dynamics and Spectroscopy*, Wiley-VCH, 2014.

Attosecond metrology: from electron capture to future signal processing, F. Krausz and M. I. Stockman, *Nat. Photon* 8, 205-213, (2014).

Jie Liu, *Classical Trajectory Perspective of Atomic Ionization in Strong Laser Fields: Semiclassical Modeling*, Springer, 2014.

Armin Scrinzi, *Attosecond Physics – Theory*, Independent Publishing Platform, 2014.

Luis Plaja, Ricardo Torres and Amelle Zaïr, *Attosecond Physics: Attosecond Measurements and Control of Physical Systems*, Springer, 2013.

Valeriy Astapenko, *Interaction of Ultrashort Electromagnetic Pulses with Matter*, Springer, 2013.

Frank Grossmann, *Theoretical Femtosecond Physics: Atoms and Molecules in Strong*

Laser Fields, Springer, 2013.

C. J. Joachain, N. J. Kylstra, R. M. Potvliege, Atoms in Intense Laser Fields, Cambridge University Press (Cambridge), 2012.

Peter Musler and Dieter Bauer, High Power Laser-Matter Interaction, Springer, 2010.

C. Rullière, Femtosecond Laser Pulses: Principles and experiments, Chap. XIII, Springer, 2005.

Attophysics: Atomic photography, Louis Di Mauro, Nature 419, 789 (2002).

Atoms in strong laser fields, Anne L'Huillier, Europhysics News 33 No 6 (2002).

X-ray Pulses Approaching the Attosecond Frontier, M. Drescher, M. Hentschel, R. Kienberger, G. Tempea, C. Spielmann, G. A. Reider, P. B. Corkum, and F. Krausz., Science 291, 1923 (2001).

Bibliografía complementaria:

Harald Friedrich, Scattering Theory, Springer, 2013.

Claude Cohen-Tannoudji and David Guéry-Odelin, Advances in Atomic Physics, World Scientific, 2011.

Intracycle and Intercycle Interferences in Above-Threshold Ionization: The Time Grating, D. G. Arbó et al., Phys. Rev. A 81, 021403(R) (2010).

D. J. Tannor, Introduction to Quantum Mechanics: A time-dependent perspective, University Science Books, 2007.

H. Friedrich, Theoretical Atomic Physics, Springer-Verlag (Berlin), 2006.

Interference oscillations in the angular distribution of laser-ionized electrons near threshold, D. G. Arbó et al., Phys. Rev. Lett. 96, 143003 (2006).

The physics of attosecond light pulses, P. Agostini and L. F. Di Mauro, Reports on Progress in Physics 67 813-855 (2004).

Ultrafast lasers. Strobe light breaks the attosecond barrier, R. F. Service, Science 292, 1627 (2001).

Absolute-phase phenomena in photoionization with few-cycle laser pulses, G. G. Paulus et al., Nature 414, 182 (2001).

Toward Attosecond Pulses, Derryck Reid, Science 291, 1911 (2001).

X.-M. Tong and Chu, Chem. Phys. 217, 119 (1997).

Rings in above-threshold ionization: A quasiclassical analysis, M. Lewenstein, K. C. Kulander, K. J. Schafer, P. H. Bucksbaum, Phys. Rev. A 51, 1495 (1995). Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields, M. Lewenstein, Ph. balcou, M. Yu. Ivanov, A. L'Huillier, P.B. Corkum, Phys. Rev. A 49 2117 (1994).

M. Ya. Amusia, Atomic Photoeffect, Plenum Press, (NY), 1990.

F. H. M. Faisal, Theory of Multiphoton Processes, Plenum Press (NY), 1987.